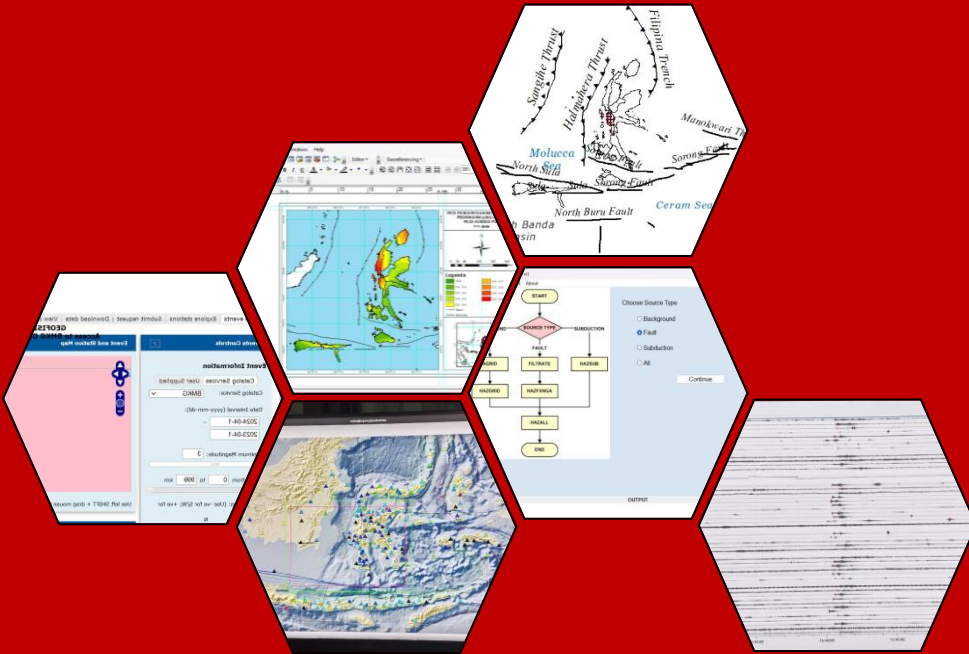


**ANALISIS KERENTANAN BENCANA GEMPABUMI DI WILAYAH MALUKU  
UTARA MENGGUNAKAN METODE PSHA (*PROBABILISTIC SEISMIC  
HAZARD ANALYSIS*)**



**ALGHIFARI RAMADHAN  
H061 20 1016**

**DEPARTEMEN GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**



**ANALISIS KERENTANAN BENCANA GEMPABUMI DI WILAYAH  
MALUKU UTARA MENGGUNAKAN METODE PSHA (*PROBABILISTIC  
SEISMIC HAZARD ANALYSIS*)**

**ALGHIFARI RAMADHAN  
H061 20 1016**



**DEPARTEMEN GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**ANALISIS KERENTANAN BENCANA GEMPABUMI DI WILAYAH MALUKU  
UTARA MENGGUNAKAN METODE PSHA (*PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD  
ANALYSIS*)**

**ALGHIFARI RAMADHAN  
H061 20 1016**

Skripsi,

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana

Program Studi Geofisika

Pada

**PROGRAM STUDI GEOFISIKA  
DEPARTEMEN GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**SKRIPSI****ANALISIS KERENTANAN BENCANA GEMPABUMI DI WILAYAH MALUKU  
UTARA MENGGUNAKAN METODE PSHA (*PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD  
ANALYSIS*)**

yang telah disusun dan diajukan oleh

**ALGHIFARI RAMADHAN**

**H061 20 1016**

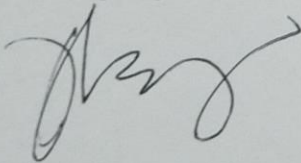
Skripsi,

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana Geofisika pada 30 Oktober  
2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

pada

Program Studi Geofisika  
Departemen Geofisika  
Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Hasanuddin  
Makassar

Mengesahkan:  
Pembimbing Tugas Akhir,



Ir. Bambang Harimei, M.Si  
NIP. 196105011990031003

Mengetahui:  
Ketua Departemen,



Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng  
NIP. 19709291993031003

## PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul “Analisis Kerentanan Bencana Gempabumi di Wilayah Maluku Utara Menggunakan Metode PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*)” adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing Ir. Bambang Harimei, M.Si sebagai Pembimbing Utama. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 22 November 2024



**Alghifari Ramadhan**  
**H061 20 1016**

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program Sarjana di Departemen Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.

Skripsi ini tidak akan selesai tanpa dukungan dan bantuan dari banyak pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, saya ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak **Ir. Bambang Harimei, M.Si** selaku pembimbing utama yang telah tulus dan sabar memberikan bimbingan nasehat dan motivasi kepada penulis hingga terselesaikan skripsi ini.
2. Bapak **Drs. Erfan, M.Si** dan Bapak **Sabrianto Aswad, S.Si, MT** selaku dosen penguji pada seminar hasil dan sidang skripsi yang telah memberi masukan serta saran kepada penulis.
3. Bapak **Dr. Muhammad Alimuhammad Hamzah, M.Eng** selaku Ketua Departemen, Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.
4. Seluruh **Dosen Departemen Geofisika, Staf Departemen Geofisika** dan **Staf Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam** atas segala ilmu yang telah diajarkan serta pelayanan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh pendidikan di Universitas Hasanuddin.
5. Sosok yang selalu hadir dalam setiap langkah dan doa penulis, alm. Ayahanda tercinta, **Aco Jaelani**. Penulis mempersembahkan Skripsi ini untuk Ayah. Meski Ayah sudah tiada, penulis percaya Ayah menyaksikan dari kejauhan, dan semoga pencapaian ini membuat Ayah bangga, di mana pun Ayah berada sekarang.
6. Ibunda tercinta, **Aprina Makmur**, yang selalu mendoakan, memberikan dukungan, cinta, dan kesabaran tanpa batas kepada penulis selama menyelesaikan skripsi ini.
7. Keluarga penulis, terutama adik penulis **Ghazy Ghalibie** yang selalu menjadi motivasi bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.
8. **HMGF FMIPA Unhas** yang telah menjadi wadah bagi penulis dan rekan-rekan mahasiswa untuk belajar, berkembang, dan berkolaborasi. Pengalaman berharga yang penulis dapatkan selama menjadi bagian dari himpunan ini telah memberikan banyak pelajaran, baik dalam hal kepemimpinan, kerjasama tim, maupun pengembangan diri.
9. Teman-teman seperjuangan sekaligus menjadi saudara yang selalu membantu diperantauan "**T20POSFER**" (**Asmawan, Faiz, Dayat, Awi, Merlia, Toktok, Dirham, Ansyah, Ime, As3, Regita, Iis, Sanra, Emi, Taze, Resty, Icha, Milka, Izzah, Aini, Alif, Angeli, Arpah, Asi, Aurel, Aza, Echa, Cholis, Defina, Ema, Fadia, Golo, Guntur, Hasna, Ical, Ima, Indah, Jane, Lola, Mela, Mifta, Nikom, Nisa, Rezky, Rianul, Riska, Selfi, Tiwi, Wikal,**

**Wulan, Yonas, Yudi, Agung, Fira, Gery, Qalby, Umi, Hamman, Mage dan Ihsan)** dan juga teman **Geofisika 2020**.

10. Teman sekaligus keluarga "**LANRAKI**" (**Toktok, Asmawan, Husen, Site, Wikal, Abe, Aan, Resty, Merlia dan Regita**) yang menjadi tempat dan keluarga pertama saat menginjakkan kaki diperantauan.
11. Kepada semua orang baik, Seperti **Asmawan, Dirham, Imran, Wikal, Rezky, Iis, Sanra, Regita, Resty, As3, Nisfit, Taze dan semua orang yang tak sempat saya sebutkan**. Terima kasih atas kehadiran, doa dan dukungan emosional di masa – masa sulit setelah kepergian ayah penulis. Kehadiran kalian memberikan semangat untuk terus melangkah menyelesaikan studi ini.
12. Teman – teman **ERT Bau – bau (Asmawan, Dirham, Ical, Malik, Shane, Irman, Henry, Rita dan Rifkah)** yang juga telah merasakan bagaimana panasnya matahari di Buton Tengah dan juga sebagai teman berbagi ilmu.
13. Teman – teman **KKN ANRANG BOCIL FUNKY (Feby, Farid, Accip, Abner, Emil, Rahma, Fira, Dilla dan Tasya)**. Terimakasih telah memberikan momen – momen yang tidak akan terulang kembali dan salah satu pengalaman terbaik selama masa perkuliahan. Penulis sangat bersyukur dipertemukan dengan kalian, terutama untuk **Feby** yang telah menjadi bagian penting dalam perjalanan ini.
14. Teman SD saya **Ibnu** yang telah meminjamkan kosnya sebagai tempat pelarian penulis untuk menyusun skripsi.
15. **Alghifari Ramadhan** sebagai penulis skripsi ini yang telah berjuang untuk mencapai tahap ini, bertahan menghadapi berbagai tekanan, dan terus menjaga semangat hingga akhirnya berhasil menyelesaikan skripsi ini.

serta kepada seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, terima kasih untuk semuanya.

Makassar, November 2024  
Penulis



Alghifari Ramadhan

## ABSTRAK

ALGHIFARI RAMADHAN. **Analisis Kerentanan Bencana Gempabumi di Wilayah Maluku Utara menggunakan Metode PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*)** (dibimbing oleh Ir. Bambang Harimei, M.Si).

**Latar Belakang.** Laut Maluku adalah contoh cekungan yang tertutup karena tabrakan antara Busur Halmahera dan Sangihe, dengan Lempeng Maluku tersubduksi atau masuk ke bawah keduanya. Interaksi ini mempengaruhi aktivitas tektonik dan vulkanik di Maluku Utara. **Tujuan.** Adapun tujuan pokok pada penelitian ini untuk mengetahui nilai percepatan batuan di wilayah Maluku Utara dan tingkat aktivitas tektonik di wilayah tersebut berdasarkan seismisitas serta kerapuhan batuan dengan menggunakan metode PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*). Penelitian ini menggunakan data dari katalog BMKG selama periode 2014 – 2024. **Hasil.** Hasil penelitian untuk probabilitas terlampaui 2 % dalam 50 tahun (periode ulang gempa 2475 tahun) menunjukkan bahwa Provinsi Maluku Utara memiliki rentang nilai percepatan tanah 0,08g hingga 0,85g pada kondisi PGA (*Peak Ground Acceleration*), 0,2g hingga 2,19g untuk periode pendek  $T=0,2$  detik, dan 0,1g hingga 0,65g untuk periode panjang  $T=1$  detik. **Kesimpulan.** Daerah Kepulauan Tidore, Ternate, Pulau Morotai, Halmahera Utara, dan Halmahera Barat memiliki tingkat laju gempa tertinggi yang terjadi setiap tahun (*Annual rate of Exceedance*). Tingginya tingkat laju gempa di wilayah-wilayah tersebut disebabkan oleh aktivitas Subduksi dan Sesar yang aktif di Provinsi Maluku Utara.

**Kata Kunci:** Laut Maluku, Lempeng Maluku, aktivitas tektonik, seismisitas, percepatan batuan, Maluku Utara, PSHA



## ABSTRACT

ALGHIFARI RAMADHAN. **Earthquake Disaster Vulnerability Analysis in the North Maluku Region using the PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*) Method** (supervised by Ir. Bambang Harimei, M.Si).

**Background.** The Maluku Sea is an example of a basin that was closed due to the collision between the Halmahera and Sangihe Arcs, with the Maluku Plate subducted or submerged under both. This interaction affects tectonic and volcanic activity in North Maluku. **Purpose.** The main purpose of this study is to determine the value of rock acceleration in the North Maluku region and the level of tectonic activity in the region based on seismicity and brittleness of rocks using the PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*) method. This study uses data from the BMKG catalog during the period 2014 – 2024. **Result.** The results of the study for the probability of exceeding 2% in 50 years (2475 years of earthquake recurrence) show that North Maluku Province has a range of soil acceleration values of 0.08g to 0.85g in PGA (*Peak Ground Acceleration*) conditions, 0.2g to 2.19g for short periods  $T=0.2$  seconds, and 0.1g to 0.65g for long periods  $T=1$  second. **Conclusion.** The Tidore Islands, Ternate, Morotai Island, North Halmahera, and West Halmahera have the highest earthquake rate that occurs every year (*Annual rate of Exceedance*). The high rate of earthquake rates in these areas is caused by active Subduction and Fault activities in North Maluku Province.

**Keywords:** Maluku Sea, Maluku Plate, tectonic activity, seismicity, rock acceleration, North Maluku, PSHA

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	iv
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA.....	v
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vi
ABSTRAK .....	viii
ABSTRACT .....	ix
DAFTAR ISI .....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Dan Manfaat .....	2
1.2.1 Tujuan.....	2
1.2.2 Manfaat.....	2
1.3 Landasan Teori.....	3
1.3.1 Tektonik Maluku Utara .....	3
1.3.2 Gempabumi .....	4
1.3.2.1 Kedalaman Gempabumi .....	5
1.3.2.2 Parameter Gempabumi (Tambah Magnitudo).....	5
1.3.3 Risiko Gempa ( <i>Seismic Risk</i> ).....	6
1.3.4 Parameter Seismik.....	6
BAB II METODE PENELITIAN.....	8
2.1 Lokasi Penelitian.....	8
2.2 Alat dan Bahan .....	8
2.2.1 Alat.....	8
2.2.2 Bahan .....	8
2.3 Pengolahan data.....	8
2.4 Magnitudo Momen (Mw) .....	9
2.4 Pemodelan Sumber Gempa.....	9
2.5 Karakterisasi Sumber Gempa .....	10
2.6 Penentuan Fungsi Atenuasi.....	12
2.6.1 Persamaan GMPE Boore and Atkinson NGA 2008 .....	12
2.6.2 Persamaan GMPE Campbell and Bozorgnia NGA 2008 .....	12
2.6.3 Persamaan GMPE Chio-Youngs NGA 2008.....	13
2.6.4 Persamaan GMPE Youngs dkk (1997).....	14
2.6.5 Persamaan GMPE Atkinson and Boore (2003).....	14
2.6.6 Persamaan GMPE Zhao et al., 2006 .....	15
2.7 <i>Logic Tree</i> .....	15
2.8 Analisis <i>Seismic Hazard</i> .....	17

2.9 Peta Percepatan Tanah di Batuan Dasar .....	18
2.9 Bagan Alir .....	18
BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN .....	19
3.1 Analisis <i>Probabilistic Seismic Hazard Analysis</i> (PSHA).....	19
3.2.1 Percepatan Tanah Maksimum di Batuan Dasar PGA .....	19
3.2.2 Percepatan Tanah Maksimum PGA pada kondisi $T=0,2s$ .....	20
3.2.3 Percepatan Tanah Maksimum di Batuan Dasar PGA pada kondisi $T=1s$ .....	21
3.3 perbedaan Hasil Penelitian SNI Tahun 2017 .....	21
3.3.1 Percepatan Tanah Maksimum di Batuan Dasar (PGA).....	21
3.3.2 Percepatan Tanah Maksimum pada kondisi $T=0,2s$ .....	23
3.3.3 Percepatan Tanah Maksimum $T=1s$ .....	24
3.4 Kurva Bahaya Gempa ( <i>Seismic Hazard Curve</i> ).....	25
3.4.1 Kurva Bahaya Gempa untuk Halmahera Barat .....	25
3.4.2 Kurva Bahaya Gempa untuk Halmahera Selatan .....	26
3.4.3 Kurva Bahaya Gempa untuk Halmahera Tengah .....	27
3.4.4 Kurva Bahaya Gempa untuk Halmahera Timur .....	27
3.4.5 Kurva Bahaya Gempa untuk Halmahera Utara.....	28
3.4.6 Kurva Bahaya Gempa untuk Kepulauan Sula .....	29
3.4.7 Kurva Bahaya Gempa untuk Pulau Morotai .....	30
3.4.8 Kurva Bahaya Gempa untuk Ternate.....	31
3.4.9 Kurva Bahaya Gempa untuk Tidore Kepulauan.....	32
BAB IV KESIMPULAN .....	33
DAFTAR PUSTAKA.....	34

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Tektonik Lempeng Maluku (Zhang Dkk., 2017) .....	4
Gambar 2 Peta Lokasi Penelitian.....	8
Gambar 3 Sebaran gempa, subduksi dan sesar di sekitar wilayah Maluku Utara (PUSGEN 2017) .....	10
Gambar 4 Segmentasi Subduksi Di Indonesia (PUSGEN 2017).....	11
Gambar 5 Sebaran <i>b-value</i> di wilayah Maluku Utara.....	11
Gambar 6 <i>Logic Tree</i> model sumber gempa Subduksi.....	16
Gambar 7 <i>Logic Tree</i> model sumber gempa <i>fault</i> .....	16
Gambar 8 PSHA Untuk Mendapatkan Pergerakan Tanah Di Batuan Dasar (Irsyam, dkk., 2010).....	17
Gambar 9 Peta Nilai Percepatan Tanah di Batuan Dasar (PGA).....	20
Gambar 10 Peta Nilai Percepatan Tanah di Batuan Dasar kondisi T=0,2 detik.....	20
Gambar 11 Peta Nilai Percepatan Tanah di Batuan Dasar pada kondisi T=1 detik.....	21
Gambar 12 Hasil Penelitian Peta Bahaya Gempa pada kondisi PGA.....	22
Gambar 13 Peta PUSGEN 2017 untuk PGA (Irsyam.M.,dkk,2017).....	22
Gambar 14 Hasil penelitian peta bahaya gempa pada T= 0,2 detik .....	23
Gambar 15 Peta PUSGEN 2017 untuk T = 0,2 detik (Irsyam.M.,dkk,2017).....	23
Gambar 16 Hasil Penelitian Peta Bahaya Gempa pada T = 1 detik .....	24
Gambar 17 Peta PUSGEN 2017 untuk T = 1 detik (Irsyam.M.,dkk,2017).....	25
Gambar 18 Kurva hazard gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk daerah Halmahera barat .....	26
Gambar 19 Kurva hazard gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk daerah Halmahera Selatan .....	26
Gambar 20 Kurva hazard gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk daerah Halmahera Tengah .....	27
Gambar 21 Kurva hazard gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk daerah Halmahera Timur .....	28
Gambar 22 Kurva hazard gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk daerah Halmahera Utara.....	29
Gambar 23 Kurva hazard gempa kondisi PGA di batuan dasar Kepulauan Sula ...	30
Gambar 24 Kurva hazard gempa kondisi PGA di batuan dasar Pulau Morotai .....	31
Gambar 25 Kurva hazard gempa kondisi PGA di batuan dasar Ternate .....	32
Gambar 26 Kurva hazard gempa kondisi PGA di batuan dasar untuk Tidore Kepulauan.....	32

**DAFTAR TABEL**

Tabel 1 Hubungan parameter – parameter resiko gempa (SNI 1726:2012) .....	6
Tabel 2 Data dan parameter sumber gempa fault untuk daerah Maluku dan sekitarnya (Pusgen 2017) .....	10

**DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran 1 Perhitungan Excel.....	37
1.1 Probabilitas Jarak .....	37
1.2 Probabilitas Magnitudo .....	38
1.3 Atenuasi Percepatan Tanah.....	39
1.4 Probabilitas P(z).....	41
1.5 Probabilitas Total .....	42
1.6 Kurva <i>Seismic Hazard</i> .....	43
Lampiran 2 Tabel nilai PGA Provinsi Maluku Utara .....	44
2.1 Tabel Nilai Percepatan Tanah Maksimum di Batuan Dasar Provinsi Maluku Utara. .....	44
2.2 Tabel Nilai Percepatan Tanah Maksimum pada Kondisi 0.2 detik Provinsi Maluku Utara .....	49
2.3 Tabel Nilai Percepatan Tanah Maksimum pada Kondisi 1 detik Provinsi Maluku Utara .....	55

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Secara geografis Indonesia terletak diantara 2 benua yaitu Asia dan Australia juga 2 samudera yakni Samudera Hindia dan Samudera Pasifik. Selain geografis, Indonesia terletak secara astronomis di 6°LU (Lintang Utara) - 11°LS (Lintang Selatan) dan 95°BT (Bujur Timur) - 141°BT (Bujur Timur). Berdasarkan letak astronomis, Indonesia terletak pada wilayah pertemuan antara tiga lempeng yang bergerak yaitu lempeng Eurasia, Indo-Australia dan Pasifik. Indonesia sebagai wilayah *Ring of fire* yang terbentang sejauh 40.000 km yang membuat Indonesia memiliki gunung - gunung aktif yang tersebar di pulau Jawa. Hal tersebutlah yang menjadikan wilayah Indonesia memiliki potensi gempa bumi yang tinggi serta letusan - letusan gunung berapi di wilayah cekungan Samudra Pasifik (Utomo & Purba, 2019).

Daerah laut Maluku merupakan contoh yang unik dari penutupan cekungan akibat tabrakan dari dua busur samudra, yaitu Busur Halmahera dan Sangihe. Daerah ini berada dalam zona kompleks interaksi Lempeng Pasifik, lempeng Filipina, Lempeng Eurasia dan Lempeng Australia. Kondisi Lempeng Maluku saat ini tersubduksi di sepanjang batas timur di bawah Busur Halmahera dan Batas barat bawah busur Sangihe. Akibat dari interaksi busur Halmahera dan busur Sangihe di Maluku Utara sangat signifikan dan beragam, terutama dalam hal aktivitas tektonik dan vulkanik. Kedua busur ini berada di zona tumbukan kompleks yang dikenal sebagai zona subduksi ganda, di mana lempeng Laut Maluku menunjам ke bawah busur Halmahera di timur dan busur Sangihe di barat. Akibat dari subduksi ini, kawasan tersebut menjadi sangat rawan terhadap gempa bumi dan tsunami (PUSGEN 2017).

Gempabumi (*earthquake*) adalah peristiwa bergetar atau berguncangnya bumi karena adanya pergerakan/pergeseran lapisan batuan pada kulit bumi secara tiba-tiba akibat pergerakan lempeng-lempeng tektonik. Selain terjadi karena pergerakan lempeng tektonik gempa bumi juga bisa terjadi dikarenakan adanya aktifitas gunung berapi yang dimana gempa tersebut dinamakan gempa bumi vulkanik.

Provinsi Maluku Utara seringkali mengalami bencana gempa tektonik, di mana 7.203 kejadian tercatat selama tahun 2009-2019. Seismisitas yang tinggi tersebut dipicu oleh aktivitas seismo-tektonik Lempeng Filipina, Eurasia, dan Australia yang memengaruhi kondisi tektonik Maluku Utara dan sekitarnya (Risanti & Prastowo, 2021).

Provinsi Maluku Utara berada di timur laut wilayah perairan Indonesia yang berbatasan dengan Laut Pasifik di utara dan timur, Pulau Seram di selatan, dan Pulau Sulawesi di barat. Pada tahun 2012 telah dilakukan penelitian mengenai Intensitas gempa bumi di Maluku Utara dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu daerah

dengan intensitas < VII MMI, VII – VIII MMI, dan intensitas > VIII MMI. Daerah dengan intensitas  $\geq$  VII MMI dan atau percepatannya  $\geq$  0,4g umumnya dilalui oleh sesar (Sulaeman dan Cipta, 2012).

Berdasarkan data BMKG terjadi gempa bumi berkekuatan  $M=7,2$  dengan lokasi episenter gempa bumi terletak pada koordinat 0,56 LS dan 128,06 BT, atau tepatnya berlokasi di darat pada jarak 63 km arah timur Kota Labuha, Kabupaten Halmahera Selatan, Provinsi Maluku Utara pada kedalaman 10 km. Gempa bumi tersebut menyebabkan adanya satu orang meninggal dunia di Kelurahan Gane Luar, Kecamatan Gane Timur Selatan, dan merobohkan sedikitnya 160 bangunan rumah. Kerugian akibat gempa ini diperkirakan mencapai lebih dari Rp 300 miliar. Kerusakan terbesar terjadi pada rumah penduduk, sekolah, jalan, jembatan, dermaga, serta fasilitas umum seperti masjid dan gereja.

Untuk memungkinkan para insinyur dan perencana kota untuk mengestimasi risiko seismik secara lebih akurat di suatu lokasi, maka perlu dilakukan analisis menggunakan metode PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*). Dengan memahami probabilitas terjadinya gempa bumi dengan kekuatan tertentu dalam periode waktu tertentu, pihak berwenang dapat membuat keputusan yang lebih baik terkait desain dan pembangunan infrastruktur yang dimana metode PSHA pertama kali dikembangkan berdasarkan teori probabilitas total. Metode PSHA merupakan metode yang digunakan untuk menganalisis bahaya gempa probabilistik dengan memperhitungkan dan menggabungkan faktor ketidakpastian dari besaran magnitudo, lokasi, dan waktu kejadian gempa.

## **1.2 Tujuan Dan Manfaat**

### **1.2.1 Tujuan**

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, maka tujuan yang akan dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui nilai percepatan batuan di wilayah Maluku Utara
2. Mengetahui tingkat aktivitas tektonik di wilayah Maluku Utara berdasarkan seismisitas dan kerapuhan batua

### **1.2.2 Manfaat**

Penelitian tentang Analisis Kerentanan Gempa di Maluku Utara dengan metode PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*) memiliki manfaat dalam membantu perencanaan dan desain infrastruktur tahan gempa, serta menentukan zonasi risiko gempa untuk tata ruang yang lebih aman. Hasilnya juga berguna untuk meningkatkan kesiapsiagaan serta kesadaran masyarakat terhadap gempa, dan membantu pemerintah maupun swasta dalam manajemen risiko finansial pasca gempa. Selain itu, data ini jadi dasar pengembangan teknologi konstruksi tahan gempa dan sistem peringatan dini, yang penting untuk mitigasi bencana di Maluku Utara.



## 1.3 Landasan Teori

### 1.3.1 Tektonik Maluku Utara

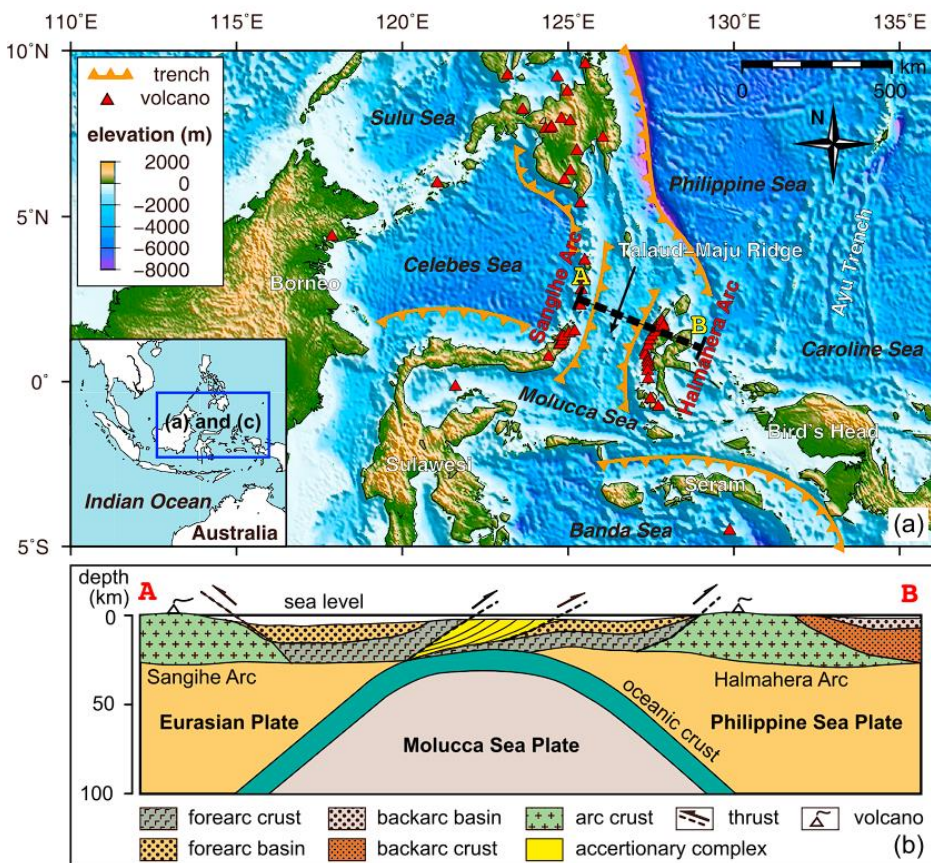
Wilayah Maluku Utara memiliki kondisi alam yang variatif. Berdasarkan letak geografis wilayah Maluku Utara ini merupakan wilayah yang dilalui sesar aktif dan kondisi litologi batuan cenderung lunak sehingga memicu efek guncangan cenderung tinggi. Hal tersebut mengakibatkan kabupaten Maluku Utara merupakan kawasan dengan tingkat aktivitas kegempaan yang relatif (Said, dkk., 2023).

Di bagian utara Maluku Utara, terdapat beberapa lempeng mikro yang mempengaruhi aktivitas seismik di kawasan tersebut, yaitu busur kepulauan Halmahera, busur kepulauan Sangihe, dan lempeng mikro di Laut Maluku. Ketiga lempeng ini merupakan pecahan dari mega lempeng Eurasia dan Pasifik yang saling berinteraksi. Busur kepulauan Halmahera dan Sangihe berinteraksi secara kompleks, dengan lempeng mikro Halmahera bergerak relatif terhadap lempeng mikro Sangihe yang berada di sebelah baratnya, sehingga menghasilkan aktivitas seismik yang signifikan. Di antara Halmahera dan Sangihe, lempeng mikro Laut Maluku memiliki pola seismisitas yang sangat kompleks, menunjukkan tekanan besar yang berkontribusi pada aktivitas seismik di kawasan tersebut.

Di bagian selatan, terdapat sesar yang memanjang dari Kepala Burung di wilayah Papua hingga Kepulauan Banggai di Sulawesi Tengah. Sesar ini berfungsi sebagai batas tektonik antara kawasan Maluku Utara, yang dipengaruhi oleh lempeng Eurasia dan Pasifik, dengan kawasan di selatan yang dipengaruhi oleh lempeng Indo-Australia. Sesar ini merupakan sesar mengiri (*left lateral*) yang berjenis *strike slip* di bagian selatan Halmahera, dan melewati beberapa wilayah seperti Kepulauan Bacan, Pulau Obi, dan Kepulauan Sula.

Tingkat seismisitas menunjukkan bahwa lempeng Halmahera mencapai kedalaman sekitar 200 km dan Sangihe maupun Halmahera terekspos kepermukaan, sedangkan lempeng Laut Maluku sepenuhnya tenggelam dibawah dua lempeng mikro (Masinu, dkk., 2018).

Provinsi Maluku Utara terutama pulau Halmahera dan sekitarnya merupakan bagian dari kerangka sistem tektonik Indonesia yang kompleks dan memiliki aktifitas tektonik yang tinggi. Maluku Utara berada pada zona pertemuan lempeng Eurasia, Lempeng pasifik, lempeng Indo-Australia dan Lempeng-lempeng kecil lainnya contohnya filipina seperti pada gambar 1.



**Gambar 1** Tektonik Lempeng Maluku (Zhang Dkk., 2017)

Pulau Halmahera berada pada jalur sirkum pasifik atau deretan pegunungan pasifik. Pertemuan lempeng pada zona ini bersifat konvergen karena keduanya saling bertumbukan dengan batas pertemuan antara lempeng-lempeng ini ditandai adanya palung lautan.

Pulau Halmahera memiliki tingkat kegempaan yang tinggi. Hal ini terjadi karena pergerakan lempeng Eurasia terhadap lempeng pasifik dan beberapa lempeng kecil sekitarnya. Akibat dari geodinamika yang terjadi. Jelas bahwa daerah Maluku Utara memiliki aktivitas seismik yang cukup tinggi, dengan faktor utamanya karena terdapat banyak struktur geologi berupa antiklin, sinklin, sesar naik, sesar mendatar dan sesar normal akibat aktivitas lempeng di daerah ini (Sadjab, dkk., 2022).

### 1.3.2 Gempabumi

Gempa bumi terjadi disebabkan adanya pergerakan tiba-tiba dari lapisan batuan yang berada di dalam bumi menghasilkan energi yang dipancarkan ke segala arah berupa gelombang gempabumi atau gelombang seismik. Getaran dari gelombang ini dapat merusak segala sesuatu dipermukaan bumi seperti bangunan dan infrastruktur

lainnya ketika sampai dipermukaan sehingga gempa bumi dapat menimbulkan korban jiwa dan harta benda (Sunarjo, dkk., 2012).

Berdasarkan teori lempeng tektonik, terdapat beberapa pecahan lempeng tektonik besar dipermukaan bumi. Lempeng tektonik merupakan segmen keras pada kerak bumi yang mengapung di atas atmosfer yang cair dan panas yang membuat lempeng tektonik ini bebas untuk bergerak dan saling berinteraksi satu sama lain. Seperti pada gambar

Lapisan bumi yang panas membuat terjadinya pergerakan sesuai dengan proses pendistribusian panas arus konveksi. Terdapat tiga kemungkinan pergerakan lempeng, yaitu apabila kedua lempeng saling menjauhi (*spreading*), saling mendekati (*collision*) dan saling geser (*transform*) (Rachman, 2017).

### **1.3.2.1 Kedalaman Gempabumi**

Menurut Fowler (1990) gempa bumi dapat diklasifikasikan berdasarkan kedalaman fokus (Hypocentre) dimana untuk gempa bumi dangkal kurang dari 70 km, gempa bumi menengah kurang dari 300 km dan gempa bumi dalam lebih dari 300 km atau 450 km.

### **1.3.2.2 Parameter Gempabumi (Tambah Magnitudo)**

#### **1. Origin Time**

*Origin time* adalah waktu pada saat gempa bumi terjadi disumbernya pada kedalaman tertentu dilapisan bumi. Pada waktu terjadinya gempa bumi tersebut akumulasi tegangan (*Stress*) terlepas dalam bentuk penjalaran gelombang gempa bumi. Hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit, detik dalam satuan UTC (*Universal Time Coordinated*) menyatakan waktu asal.

#### **2. Arah dan Kedalaman**

Arah gempa bumi menunjukkan arah lokasi datangnya gempa bumi terjadi sesuai arah mata angin. Sedangkan jarak hiposenter dihitung tegak lurus dari permukaan bumi merupakan kedalaman sumber gempa bumi.

#### **3. Magnitudo**

Kekuatan gempa bumi atau magnitudo adalah ukuran kekuatan gempa bumi yang menggambarkan besarnya energi yang terlepas pada saat gempa bumi terjadi dan hasil pengamatan seismograf. Richter memperkenalkan konsep magnitudo (kekuatan gempa bumi di sumbernya) secara umum dengan satuan skala *Richter*.

#### **4. Energi Gempa**

Bentuk energi yang dilepaskan saat terjadinya gempa bumi antara lain adalah energi deformasi gelombang. Energi deformasi dapat dilihat pada perubahan bentuk volume sesudah terjadinya gempa bumi, seperti misalnya tanah naik, tanah turun, pergeseran batuan, dan lain-lain. Sedangkan energi gelombang akan menggetarkan medium elastis di sekitarnya dan akan menjalar ke segala arah.

### 5. Intensitas Kerusakan

Tingkat kerusakan akibat gempa bumi dinyatakan juga dalam intensitas. Intensitas dihitung berdasarkan pengamatan visual langsung terhadap kerusakan akibat gempa bumi, dan intensitas ini dapat memberikan gambaran nilai kekuatan gempa bumi pada pusat gempanya. Perbedaan magnitudo dengan intensitas dari suatu gempa bumi adalah magnitudo dihitung dari catatan alat sedangkan intensitas didasarkan atas akibat langsung dari getaran gempa bumi (Sunarjo, dkk., 2012).

#### 1.3.3 Risiko Gempa (*Seismic Risk*)

Resiko gempa adalah kemungkinan terlampauinya (*probability of exceedance*) suatu gempa dengan intensitas tertentu selama masa bangunan. Nilai dari resiko gempa secara matematik dinyatakan dalam persamaan 2.1.

$$R_n = 1 - (1 - R_a)^N \quad (1)$$

Dimana,  $R_n$  adalah risiko gempa,  $R_a$  adalah risiko tahunan  $1/T$ ,  $T$  adalah periode ulang gempa dan  $N$  adalah masa guna bangunan (Pasau & Tanauma, 2011).

**Tabel 1** Hubungan parameter – parameter resiko gempa (SNI 1726:2012)

<i>Annual rate</i>	T (Periode Ulang)	Rn (Nilai resiko gempa)	N (Umur bangunan)
	Tahun	%	Tahun
0.002105	475	10	50
0.000404	2.475	2	50
0.000202	4.950	2	100

Tabel 1 menampilkan hubungan parameter-parameter *annual rate*, periode ulang (*return period*), resiko gempa (*probability of exceedance*) dan umur bangunan yang akan ditinjau. Saat ini, peraturan bangunan internasional terbaru untuk bangunan tahan gempa menggunakan peta bahaya kegempaan dengan resiko terlampaui sebesar 10% dan 2% selama masa bangunan 50 tahun atau setara dengan periode ulang gempa 475 tahun dan 2475 tahun.

#### 1.3.4 Parameter Seismik

Parameter nilai-a menggambarkan tingkat aktivitas gempa yang dipengaruhi oleh luas wilayah, durasi pengamatan, dan magnitudo terbesar. Sedangkan, parameter nilai-b menggambarkan tingkat tegangan tektonik dan tingkat kerapuhan batuan di bawah permukaan suatu daerah.

Penentuan parameter *a-value* dan *b-value* bertujuan untuk memetakan kerentanan sekaligus menjadi basis terhadap potensi bahaya bencana gempa tektonik sebagai upaya pengurangan risiko bencana gempa tektonik yang ditimbulkan di wilayah Maluku.

Tingkat seismisitas suatu wilayah dapat diketahui melalui persamaan distribusi frekuensi-magnitudo gempa dari hukum Gutenberg-Richter sebagai berikut.

$$\log N = a - bM \quad (2)$$

Di mana  $N$  adalah frekuensi kejadian gempa tektonik dengan jangkauan magnitudo  $M \geq M_c$  di wilayah yang sedang diamati selama kurun waktu tertentu. Dalam hal ini,  $M_c$  (*magnitude of completeness*) merupakan magnitudo terkecil yang bisa dideteksi dengan baik oleh instrumen ukur di lapangan sebagai fungsi spasial dan temporal. Dengan kata lain,  $M_c$  berfungsi sebagai batas bawah jangkauan magnitudo di mana hukum Gutenberg-Richter masih valid. Akurasi  $M_c$  ikut menentukan akurasi estimasi parameter seismik *a-value* dan *b-value*.

Persamaan (2) merupakan persamaan garis lurus antara  $\log N$  sebagai variabel respons di sumbu  $Y$  sedangkan  $M$  sebagai variabel manipulasi di sumbu  $X$ , parameter *a-value* adalah titik potong garis lurus terhadap variabel respons sedangkan *b-value* adalah kemiringan garis lurus yang menunjukkan relasi linier distribusi frekuensi magnitudo sebagai prekursor terjadi gempa besar (Apriliani & Prastowo, 2021).

Model Gutenberg-Richter menggambarkan bahwa frekuensi kejadian gempa bumi dengan magnitudo  $M \geq m$  per unit waktu berkurang secara eksponensial seiring dengan bertambahnya magnitudo gempa. Hubungan ini dapat dinyatakan dengan rumus pada persamaan (3).

$$\text{Log} \lambda_M(m) = a - b m \quad (3)$$

atau

$$\lambda_M = 10^{a-bm} = e^{\alpha-\beta m} \quad (4)$$

Dalam bentuk eksponensial, persamaan (4) akan menghasilkan nilai  $\alpha$  dan  $\beta$  yang dapat ditentukan seperti berikut.

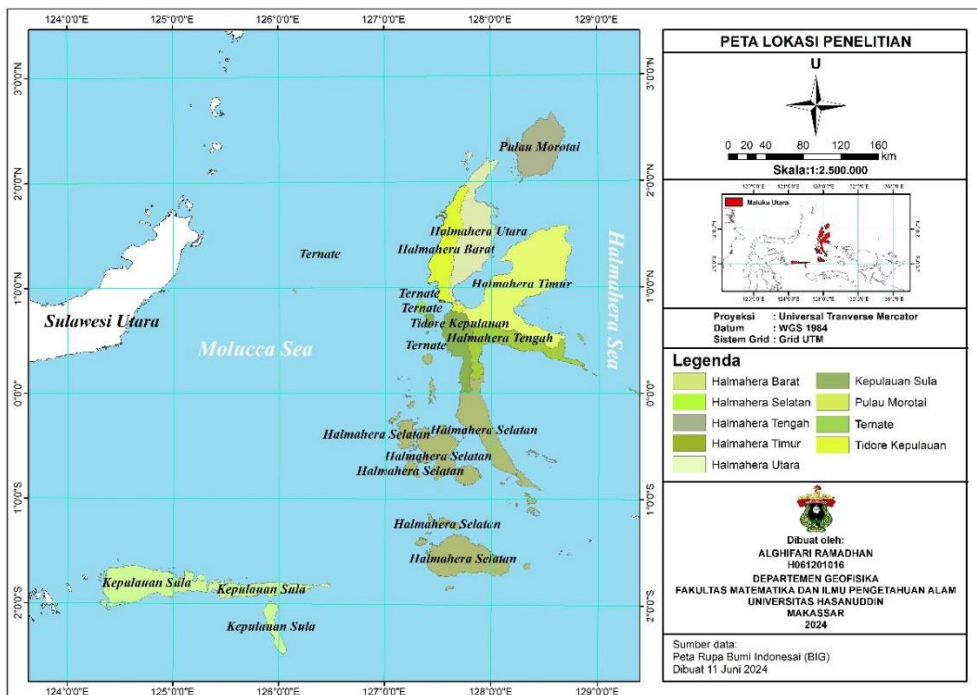
$$\alpha = a \ln 10 \approx 2.303 a \quad (5)$$

$$\beta = b \ln 10 = 2.303 b \quad (6)$$

## BAB II METODE PENELITIAN

### 2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada pada koordinat  $2^{\circ}8'24''$  LS –  $2^{\circ}57'46''$  LS dan  $118^{\circ}45'26''$  BT –  $119^{\circ}47'48''$  BT Provinsi Maluku Utara



Gambar 2 Peta Lokasi Penelitian

### 2.2 Alat dan Bahan

#### 2.2.1 Alat

Adapun alat yang digunakan dalam proses pengolahan data:

1. Software USGS PSHA
2. Software Matlab R2021a dengan bantuan ZMAP 7
3. Software ArcGis 10.8
4. Microsoft Excel 2019

#### 2.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan adalah data sekunder Gempa Bumi di Maluku Utara dengan *buffer* 200 km dari katalog BMKG tahun 2014 – 2024.

### 2.3 Pengolahan data

Data gempa yang digunakan dalam penelitian ini dikumpulkan dari katalog BMKG dengan batas koordinat  $-4,28^{\circ}$  –  $-4,35^{\circ}$  LS dan  $122,5^{\circ}$  –  $131,33^{\circ}$  BT dari tahun 2014 sampai 2024.

## 2.4 Magnitudo Momen ( $M_w$ )

Skala magnitudo mengukur ukuran dan pelepasan energi gempa bumi. Skala magnitudo pertama diusulkan oleh Richter (1935) untuk mengkuantifikasi ukuran gempa bumi di California selatan dari amplitudo maksimum ( $A$  dalam mm) seismogram yang direkam oleh seismograf Wood-Anderson.

Seiring dengan semakin banyaknya stasiun seismograf yang dipasang di seluruh dunia, menjadi jelas bahwa metode yang dikembangkan oleh Richter hanya berlaku untuk rentang frekuensi dan jarak tertentu. Untuk memanfaatkan semakin banyaknya stasiun seismograf yang tersebar di seluruh dunia, skala magnitudo baru yang merupakan perluasan dari ide awal Richter dikembangkan. Ini termasuk magnitudo gelombang tubuh ( $M_b$ ) dan magnitudo gelombang permukaan ( $M_s$ ). Masing-masing berlaku untuk rentang frekuensi dan jenis sinyal seismik tertentu. Dalam rentang validitasnya, masing-masing setara dengan magnitudo Richter.

Karena keterbatasan ketiga skala magnitudo ( $M_L$ ,  $M_b$ , dan  $M_s$ ), perluasan skala magnitudo baru yang lebih seragam, yang dikenal sebagai magnitudo momen, atau  $M_w$ , dikembangkan. Khususnya, untuk gempa bumi yang sangat besar, magnitudo momen memberikan estimasi ukuran gempa bumi yang paling dapat diandalkan.

Momen seismik ( $M_0$ ) adalah ukuran yang digunakan dalam seismologi untuk menggambarkan ukuran dan energi yang dilepaskan oleh gempa bumi. Ini adalah ukuran yang lebih mendasar dan fisik dibandingkan skala magnitudo tradisional seperti skala Richter. Momen seismik tidak mengalami efek saturasi seperti beberapa skala magnitudo lainnya. Ini mendefinisikan kekuatan yang diperlukan untuk menghasilkan gelombang seismik yang terekam setelah gempa bumi dan terkait dengan total energi seismik yang dilepaskan oleh patahan sesar. Momen seismik digunakan untuk mendefinisikan magnitudo momen ( $M_w$ ), yang diperkenalkan oleh Hanks dan Kanamori pada tahun 1979.

Adapun persamaan yang digunakan untuk mengkonversi skala magnitudo  $M_L$ ,  $M_b$ , dan  $M_s$  ke skala  $M_w$  adalah sebagai berikut (Taruna & Pratiwi, 2021).

$$M_w = 1,0166M - 0,2207 \quad (7)$$

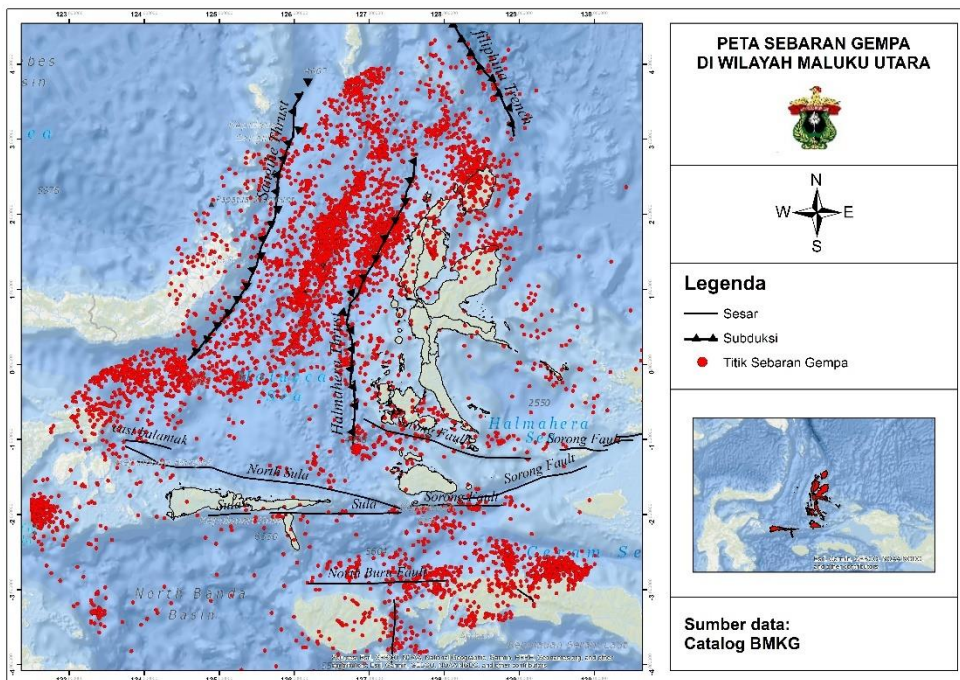
$$M_w = 1,0107M_b - 0,0801 \quad (8)$$

$$M_w = 1,6016M_s + 2,476 \quad (9)$$

## 2.4 Pemodelan Sumber Gempa

Terdapat 2 jenis sumber yang akan dimodelkan dalam penelitian ini yaitu sumber gempa subduksi dan sumber gempa *fault*/patahan. Model sumber gempa dibutuhkan untuk mendapatkan hubungan antara data kejadian gempa dan model hitungan yang akan digunakan dalam analisis PSHA untuk menentukan tingkat risiko gempa. Adapun sumber subduksi dan *fault* pada penelitian ini berdasarkan gambar (3).





**Gambar 3** Sebaran gempa, subduksi dan sesar di sekitar wilayah Maluku Utara (PUSGEN 2017)

**2.5 Karakterisasi Sumber Gempa**

Pada proses karakterisasi sumber diperlukan parameter-parameter seperti *b-value*, *a-value*, *slip-rate*, magnitudo maksimum, mekanisme, dimensi sesar dan lain-lain.

Seperti pada tabel 2 dimana pada penelitian ini terdapat beberapa sesar disekitar lokasi penelitian sebagai sumber gempabumi seperti sesar *North Sula*, sesar *South Balantak*, dan sesar *Sorong* yang diperoleh dari referensi hasil penelitian yang dilakukan oleh Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010.

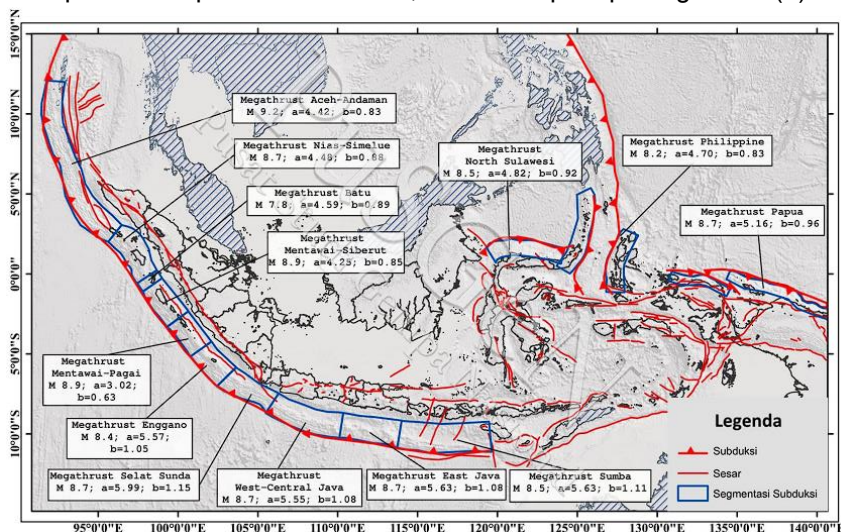
**Tabel 2** Data dan parameter sumber gempa fault untuk daerah Maluku dan sekitarnya (Pusgen 2017)

I D	Structure Name		Slip Rate mm/y r	Sense mecanism	Dip	Top	Bottom	L (Km)	M max
	Main	Segment							
1	North Sula	North Sula	20,0	Thrust	45S	3	18	405	8,1
2	South Balantak	South Balantak	15,0	Strike-Slip Sinistral	90	3	18	53	7,1
3	Sula Fault	1 kano	15,0	Strike-Slip Sinistral	90	3	18	23	6,5
4	Sula Fault	2 Talibo	15,0	Strike-Slip Sinistral	90	3	18	62	7,2
5	Sula Fault	3 Mangole	15,0	Strike-Slip Sinistral	90	3	18	159	7,6

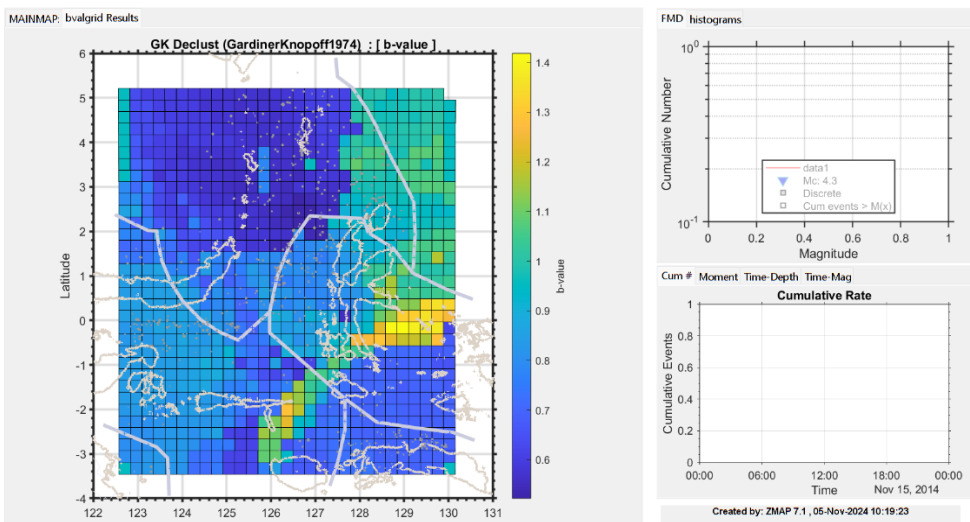


6	Sorong Fault	1 Obi	10,0	Strike-Slip Sinistral	90	3	18	137	7,6
7	Sorong Fault	2 Obi- kofiau	10,0	Strike-Slip Sinistral	90	3	18	191	7,4
8	Sorong Fault	3 North Kofiau	12,5	Strike-Slip Sinistral	90	3	18	71	7,2
9	Sorong Fault	4 South Halmahera	15,0	Strike-Slip Sinistral	60	3	18	258	7,9

proses karakterisasi sumber gempa subduksi dan juga gempa sesar diperlukan parameter-parameter *b-value*, *a-value* seperti pada gambar (4) dan (5).



Gambar 4 Segmentasi Subduksi Di Indonesia (PUSGEN 2017)



Gambar 5 Sebaran *b-value* di wilayah Maluku Utara

## 2.6 Penentuan Fungsi Atenuasi

Percepatan tanah maksimum adalah nilai terbesar percepatan tanah pada suatu tempat akibat getaran gempa bumi dalam periode waktu tertentu. Terbatasnya peralatan jaringan *accelerograf* yang tidak lengkap dari segi periode waktu maupun tempatnya menyebabkan penentuan nilai percepatan tanah maksimum lebih banyak menggunakan pendekatan formula empiris. Karena gempa merupakan peristiwa yang tak dapat diprediksi, pada umumnya dalam analisis Fungsi Atenuasi juga disertai analisis probabilitas untuk memperhitungkan besarnya kemungkinan gempa yang akan muncul. Oleh sebab itu untuk keperluan bangunan tahan gempa harga percepatan tanah dapat dihitung dengan cara pendekatan dari data historis gempabumi Beberapa Fungsi Atenuasi (Nicole Korengkeng, dkk., 2023).

### 2.6.1 Persamaan GMPE Boore and Atkinson NGA 2008

Fungsi dari Boore and Atkinson NGA 2008 terdapat pada persamaan (10).

$$\ln(Y) = f_M(M) + f_D(R_{JB}, M) + f_S(V_{S30}, R_{JB}, M) + \varepsilon\sigma_T \quad (10)$$

Dalam persamaan ini,  $f_M$ ,  $f_D$ , dan  $f_S$  mewakili skala besaran, fungsi jarak, dan amplifikasi situs, masing-masing.  $M$  adalah magnitudo momen,  $R_{JB}$  adalah jarak Joyner-Boore (didefinisikan sebagai jarak terdekat dengan proyeksi permukaan patahan, yang kira-kira sama dengan jarak episentral kejadian  $M < 6$ ), dan kecepatan  $V_{S30}$  adalah kebalikan dari rata-rata kelambatan gelombang geser dari permukaan sampai kedalaman 30 m. Variabel prediktifnya adalah  $M$ ,  $R_{JB}$ , dan  $V_{S30}$ ; jenis fault adalah prediksi opsional variabel yang masuk ke dalam skala.  $\varepsilon$  adalah bilangan pecahan simpangan baku dari satu nilai prediksi  $\ln Y$  jauh dari nilai rata-rata  $\ln Y$  (misalnya,  $\varepsilon = -1,5$  akan menjadi 1,5 standar deviasi lebih kecil dari nilai rata-rata).

### 2.6.2 Persamaan GMPE Campbell and Bozorgnia NGA 2008

Fungsi dari Campbell and Bozorgnia NGA., 2008 terdapat pada persamaan (11).

$$\ln(Y) = f_1(M) + f_2(R) + f_3(F) + f_4(HW) + f_5(S) + f_6(D) \quad (11)$$

$$f_1(M) = \begin{cases} c_0 + c_1M \\ c_0 + c_1M + c_2(M - 5.5) \\ c_0 + c_1M + c_2(M - 5.5) + c_3(M - 6.5) \end{cases} \quad (12)$$

$$f_2(R) = (c_4 + c_5M) \ln \left( \sqrt{r_{rup}^2 + c_6^2} \right) \quad (13)$$

$$f_3(F) = c_7 F_{RV} f_F(H) + c_8 F_N \quad (14)$$

$$f_F(H) = \begin{cases} H & H < 1km \\ 1 & H \geq 1km \end{cases} \quad (15)$$

$$f_4(HW) = c_9 F_{RV} f_{HW}(M) f_{HW}(H) \quad (16)$$

$$f_{HW}(R) \begin{cases} 1 & r_{jb} = 0 \text{ km} \\ 1 - (r_{jb}/r_{rup}) & r_{jb} > 0 \text{ km} \end{cases} \quad (17)$$

$$f_{HW}(M) = \begin{cases} 0 & M \leq 6.0 \\ 2(M - 6.0) & 6.0 < M < 6.5 \\ 1 & M \geq 6.5 \end{cases} \quad (18)$$

$$f_{HW}(H) \begin{cases} 0 & H \geq 20 \text{ km} \\ 1 - \left(\frac{H}{20}\right) & H < 20 \text{ km} \end{cases} \quad (19)$$

$$f_5(S) = \begin{cases} c_{10} \ln\left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right) + k_2 \left\{ \ln \left[ A_{100} + c \left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right)^n \right] - \ln[A_{100} + c] \right\} & V_{s30} < k_1 \\ (c_{10} + k_2 n) \ln\left(\frac{V_{s30}}{k_1}\right) & V_{s30} \geq k_1 \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} c_{11}(D - 1) & D < 1 \text{ km} \\ 0 & 1 \leq D \leq 3 \text{ km} \\ c_{12} \{ k_3 [0.0000454 - \exp(-3.33D)] + k_4 [0.472 - \exp(-0.25D)] \} & D > 3 \text{ km} \end{cases} \quad (21)$$

Dalam persamaan di atas,  $\ln Y$  adalah logaritma natural dari nilai median puncak percepatan tanah horizontal (PGA) dalam satuan g;  $M$  adalah magnitudo momen;  $R_{RUP}$  adalah jarak terdekat ke pecahan seismik dalam kilometer  $R_{JB}$  adalah jarak terdekat ke proyeksi permukaan pecahan seismik (disebut sebagai jarak Joyner-Boore) dalam kilometer;  $F_{RV}$  adalah variabel indikator yang mewakili patahan terbalik dan oblique terbalik, di mana  $1 F_{RV} =$  untuk  $30^\circ < \lambda < 150^\circ$  dan  $0 F_{RV} =$  untuk lainnya, di mana  $\lambda$  adalah sudut *rake*, yang didefinisikan sebagai sudut rata-rata slip dalam derajat yang diukur di bidang pecahan antara arah *strike* dan vektor slip (misalnya, Lay dan Wallace, 1995);  $F_N$  adalah variabel indikator yang mewakili patahan normal dan *oblique* normal, di mana  $F_N = 1$  untuk  $-150^\circ < \lambda < -30^\circ$  dan  $F_N = 0$  untuk lainnya;  $H$  adalah kedalaman ke puncak pecahan seismik dalam kilometer;  $V_{S30}$  adalah kecepatan gelombang geser rata-rata di 30m atas dari profil situs dalam m/s;  $PGA_r$  adalah nilai PGA pada batuan;  $D$  adalah kedalaman ke horizon kecepatan gelombang geser (kedalaman sedimen) dalam kilometer;  $c$  adalah koefisien model yang independen periode dan secara teoritis dibatasi;  $k_1$  adalah koefisien model yang tergantung periode dan secara teoritis dibatasi; dan  $c_i$  adalah koefisien model yang secara empiris diperoleh.

### 2.6.3 Persamaan GMPE Chio-Youngs NGA 2008

Parameter dari fungsi Chiou Youngs NGA., 2008 dapat dilihat dari persamaan (22) dan (23).

$$\ln(SA_{1130ij}) = c_1 + c_{1a} F_{NMi} + c_7 (Z_{TORi} - 4) + c_2 (M_i - 6) + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(c_M - M_i)}) + c_4 \ln\left(\left(R_{RUPij} + c_5 \cosh(c_6(M_i - c_{HM}, 0)_{max})\right)\right) +$$

$$(c_{4a} - c_4) \ln \left( \sqrt{R_{RUPij}^2 + c_{RB}^2} \right) + \left\{ c_{y1} + \frac{c_{y2}}{\cosh((M_i - c_{y3}, 0)_{max})} \right\} \cdot R_{RUPij} + c_9 \cdot \cos^2 \delta_i \cdot \tanh \left( \frac{R_{RUPij}}{2} \right) \tan^{-1} \left( \frac{W_i \cos \delta_i}{2(Z_{TORi+1})} \right) \frac{1}{\pi/2} \left\{ 1 - \frac{R_{JBij}}{R_{RUPij} + 0.001} \right\} + \tau \cdot Z_i \quad (22)$$

$$\ln(SA_{ij}) = \ln(SA_{1130ij}) + \phi_1 \left( \ln \frac{Vs_{30ij}}{1130}, 0 \right)_{min} + \phi_2 \left\{ e^{\phi_3((Vs_{30ij}, 1130)_{min} - 360)} - e^{\phi_3(1130 - 360)} \right\} \cdot \ln \left( \frac{SA_{1130ij} + \phi_4}{\phi_4} \right) + \sigma \cdot Z_{ij} \quad (23)$$

Dimana SA adalah percepatan spektra (g),  $R_{RUP}$  adalah jarak terdekat ke bidang rupture (km),  $R_{JB}$  adalah jarak Joiner-Boore,  $\delta$  adalah sudut dip rupture,  $W$  adalah lebar rupture (km),  $Z_{TOR}$  adalah kedalaman rupture (km),  $F_{RV} = 1$  untuk  $30^\circ \leq \lambda \leq 150^\circ$  dan nilai 0 untuk mekanisme lain (*reverse dan reverse-oblique*)  $F_{NM} = 1$  untuk  $-120^\circ \leq \lambda \leq -60^\circ$  dan nilai 0 untuk mekanisme lain (normal dan normal-oblique),  $\lambda$  adalah sudut rake,  $Vs_{30}$  adalah kecepatan geser rata-rata untuk kedalaman tanah 30m paling atas (m/dtk),  $\tau$  adalah standar error untuk *inter-event* dan  $\sigma$  adalah standar error untuk *intra-event*.

#### 2.6.4 Persamaan GMPE Youngs dkk (1997)

Parameter dari fungsi Youngs dkk., 1997 dapat dilihat dari persamaan (24).

$$\ln(y) = 0.2418 + 1.414M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.7818e^{0.554M}) + 0.00607H + 0.3846Z_r \quad (24)$$

Dimana  $y$  adalah *spektral acceleration* (g),  $M$  adalah *momen magnitude*,  $r_{rup}$  adalah jarak terdekat kerupture (km),  $H$  adalah kedalaman (km),  $Z_r$  adalah tipe sumber (0 untuk kejadian *interface*, 1 untuk kejadian *intraslab*) dan  $C$  adalah koefisien regresi untuk atenuasi.

#### 2.6.5 Persamaan GMPE Atkinson and Boore (2003)

Fungsi atenuasi Atkinson-Boore 2003 dapat dilihat dari persamaan (25).

$$\text{Log}(Y) = C_1 + C_2M + C_3h + C_4R - g \log R + C_5sL_{Sc} + C_6sL_{S_D} + C_7sL_{S_E} \quad (25)$$

$$R = \sqrt{D_{fault}^2 - \Delta^2} \quad (26)$$

$$\Delta = 0.00724 \times 10^{0.507M} \quad (27)$$

$$fn = C_1 + C_2M \quad (28)$$

Dimana  $M$  adalah momen magnitude,  $h$  adalah kedalaman sumber gempa (km),  $S_c = 1$  untuk NEHRP tanah tipe B ( $360 < Vs < 760$  m/dt) dan  $S_c$  bernilai 0 untuk tanah tipe lain,  $S_D = 1$  untuk NEHRP tanah tipe C ( $180 < Vs < 360$  m/dt) dan  $S_D$  bernilai 0 untuk tanah tipe lain,  $S_E = 1$  untuk NEHRP tanah tipe D ( $Vs < 180$  m/dt) dan  $S_E$  bernilai 0 untuk tanah tipe lain dan  $g = 10^{(1.2 - 0.13M)}$  untuk kejadian *interface* dan  $10^{(0.301 - 0.01M)}$  untuk kejadian *intraslab*.

### 2.6.6 Persamaan GMPE Zhao et al., 2006

Parameter dari fungsi Zhao et al., 2006 dapat dilihat dari persamaan (29).

$$\text{Log}_e(y) = aM_w + bx - \text{Log}_e(r) + e(h - h_c)\delta_n + F_R + S_1 + S_5 + S_{SL} \text{log}_e(x_{ij}) + C_k + r_{ij} + \eta_i \quad (29)$$

$$r_{ij} = x_{ij} + c \exp(dM_{wi}) \quad (30)$$

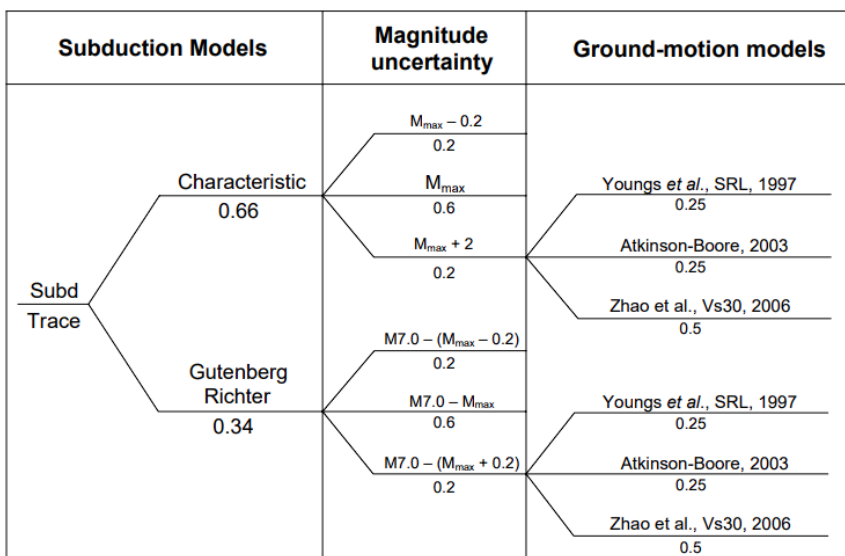
Dimana  $y$  adalah PGA ( $cm/dt^2$ ) dengan 5% damping,  $M_w$  adalah *moment magnitude*,  $x$  adalah jarak sumber gempa,  $h$  adalah kedalaman fokal,  $F_R$  adalah parameter *reverse-fault*, parameter ini hanya digunakan untuk *even crustal* dengan *reverse-faulting* nilainya 0 untuk even lain,  $S_l$  adalah parameter sumber tipe tektonik yang digunakan untuk even *interface* dan bernilai nol untuk tipe even yang lain,  $S_5$  adalah parameter untuk even subduksi slab (*intraslab*) dan bernilai 0 untuk even yang lain,  $S_{SL}$  adalah bagian jalur modifikasi dari *magnitude-independen* pada *even slab* untuk menghitung jalur perjalanan gelombang seismik yang kompleks pada *even slab*,  $C_k$  adalah koefisien *site class*,  $h_c$  adalah kedalaman konstan, dan  $r_{i,j}$  adalah *fault intra-event*.

### 2.7 Logic Tree

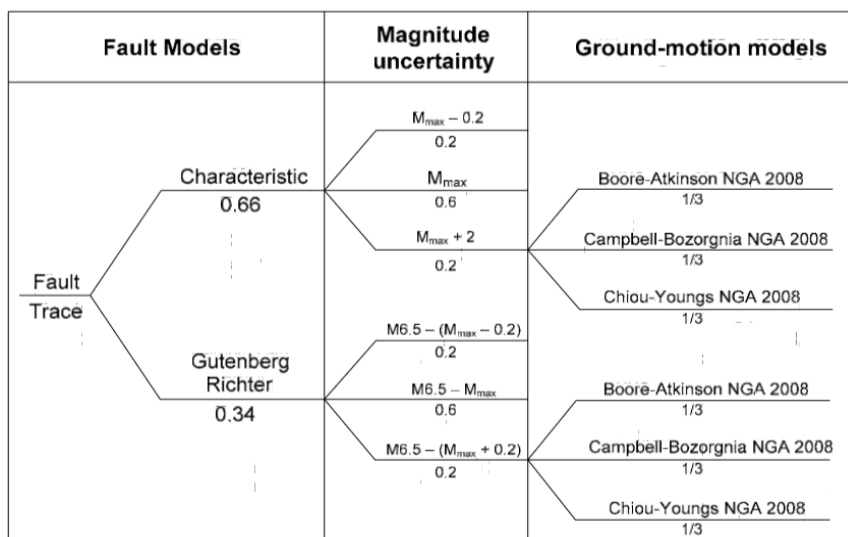
*Logic tree* adalah suatu kerangka kerja untuk mengatasi nilai ketidakpastian parameter yang dipakai pada saat perhitungan analisa resiko gempa dengan menggunakan metode PSHA. Nilai ketidakpastian parameter didapat dari Persamaan atenuasi, parameter risiko gempa dan magnitudo maksimum. Pendekatan *logic tree* memungkinkan penggunaan beberapa alternatif metode atau model dalam analisis, dimana tiap model yang digunakan untuk suatu parameter akan dikalikan dengan suatu faktor bobot yang merepresentasikan keakuratan relatif suatu model terhadap model lainnya (Paransa, dkk., 2023).

Pemilihan parameter yang terbaik dalam analisis risiko gempa, tidak dapat ditentukan dengan mudah. Penggunaan *logic tree* memberikan suatu kerangka yang sangat baik untuk memperlakukan ketidakpastian tersebut secara eksplisit. Model *logic tree* ini terdiri dari rangkaian nodal yang menyatakan titik model yang akan ditentukan dan percabangan yang menyatakan variasi model yang akan digunakan dalam analisis. Hasil penjumlahan probabilitas untuk semua cabang harus sama dengan satu (Wahyono, dkk., 2020).

Model *logic tree* yang dipakai disesuaikan dengan model sumber gempa yang digunakan seperti pada gambar (5) dan (6). Pemakaian *logic tree* dalam PSHA sangat diperlukan akibat adanya faktor ketidakpastian dalam pengelolaan data untuk analisis *seismic hazard*. Dengan adanya model *treatment* ini, data, parameter sumber gempa, dan model atenuasi yang digunakan bisa diakomodir dengan bobot sesuai dengan ketidakpastiannya (Irsyam, dkk., 2010).



Gambar 6 Logic Tree model sumber gempa subduksi (Wong, 2014).



Gambar 7 Logic Tree model sumber gempa fault.

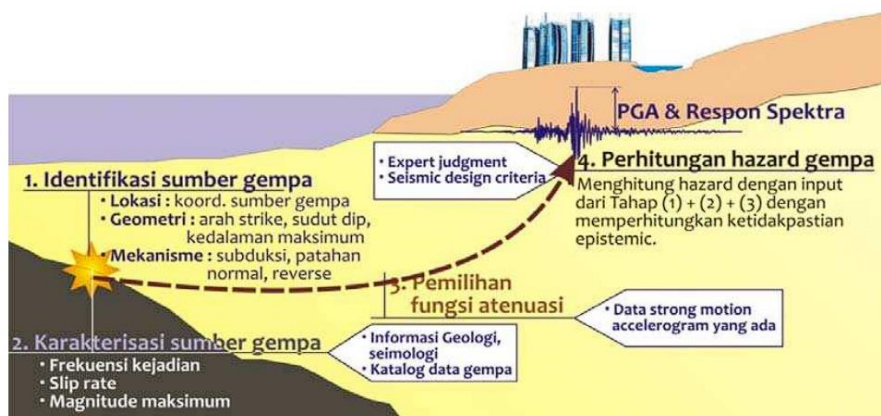
Ketidakpastian epistemik disebabkan oleh kurangnya pengetahuan masa kini. Misalnya, gempa bumi maksimum yang dapat dihasilkan oleh sumber seismik tertentu mempunyai ketidakpastian epistemik. Menurut definisinya, ketidakpastian epistemik dapat dikurangi melalui penelitian lebih lanjut dan pengumpulan data yang lebih banyak dan lebih baik. Jika gempa maksimum tidak teramati pada sumber seismik, maka besaran nya harus diperkirakan berdasarkan data lain sehingga akan menimbulkan ketidakpastian epistemik. Jika gempa terbesar terjadi, diamati dan dikenali, maka ketidakpastian epistemik gempa maksimum dapat dikurangi. Ketidakpastian epistemik baik dalam parameter masukan maupun model

diakomodasi di PSHA melalui penggunaan pohon logika di mana interpretasi alternatif dipertimbangkan dan diberi bobot (Wong, 2014).

## 2.8 Analisis Seismic Hazard

PSHA adalah formulasi matematis yang berasal dari analisis probabilitas hubungan statistik antara besarnya gempabumi, lokasi, dan redaman gerakan tanah. Metode PSHA dikembangkan oleh Cornell pada tahun 1968 yang digunakan untuk memperoleh nilai  $PGA_M$  dengan perhitungan secara empiris berdasarkan informasi sumber gempabumi dan kondisi geologi setempat. PSHA dapat menentukan frekuensi total yang melebihi berbagai tingkat gerakan tanah selama periode waktu tertentu, sehingga pendekatan ini dapat digunakan untuk menghitung bahaya gempabumi berdasarkan pada kumpulan kejadian gempabumi (Muhaimin, Tjahjono, dan Darmawan, 2016).

Metode PSHA dikembangkan oleh Cornell (1968), kemudian dilanjutkan oleh Merz dan Cornell (1973). Model dan konsep dari analisis ini tetap dipakai sampai sekarang, namun model dari analisis dan teknik perhitungannya yang terus dikembangkan oleh EERI *Committee on Seismic Risk* (EERI, 1989) memiliki empat tahap (Gambar 8), yaitu a) identifikasi sumber gempa, b) karakterisasi sumber gempa, c) pemilihan fungsi atenuasi, dan d) perhitungan *hazard* gempa.



**Gambar 8** PSHA Untuk Mendapatkan Pergerakan Tanah Di Batuan Dasar (Irsyam, dkk., 2010)

Proses kalkulasi bahaya guncangan gempa untuk peta gempa nasional 2017 menggunakan metode PSHA yang dikembangkan oleh Cornell (1968) kemudian dilanjutkan oleh Merz dan Cornell (1973). Model dan konsep analisis ini tetap dipakai sampai sekarang. Namun, model analisis dan teknik perhitungannya yang terus dikembangkan oleh EERI *Committee on Seismic Risk* (EERI, 1989) memiliki empat tahap mulai dari identifikasi sumber gempa, karakterisasi sumber gempa, pemilihan fungsi atenuasi, dan perhitungan *hazard* gempa.